

DIAGNÓSTICO DE FALLOS ELÉCTRICOS EN
LÍNEAS DE TRANSMISIÓN UTILIZANDO
ALGORITMO DE RELIEF

DIAGNÓSTICO DE FALLOS ELÉCTRICOS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN UTILIZANDO ALGORITMO DE RELIEF

Angel Giovanni Toapanta Guamán
Egresado de la Carrera de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingenierías
Universidad Politécnica Salesiana

Dirigido por:
Estuardo Josafat Correa Zapata
Carrera de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingenierías
Universidad Politécnica Salesiana



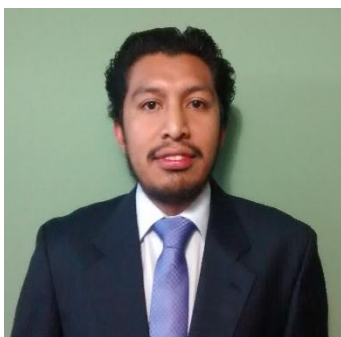
Quito - Ecuador

Angel Giovanni Toapanta Guamán

**DIAGNÓSTICO DE FALLOS ELÉCTRICOS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN
UTILIZANDO ALGORITMO DE RELIEF**

Universidad Politécnica Salesiana
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña historia e información de contacto:



Angel Giovanni Toapanta Guamán (Y'1986-M'05). Bachiller Técnico Industrial, especialidad Electricidad del Instituto Tecnológico Superior Sucre. Tecnólogo en Electromecánica de la Escuela Politécnica Nacional. Egresado de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Miembro Estudiantil del Grupo de Investigación en Redes Eléctricas Inteligentes-GIREI. Su trabajo se basa en técnicas de modelado y simulación de fallas en líneas de transmisión. Sus intereses de investigación incluyen Smart Grid, flujos óptimos de potencia, medición fasorial y modelos de optimización matemática.

atoapantag@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Estuardo J. Correa Zapata nació en Quito - Ecuador. Se graduó de Ingeniero de Sistemas en 1997 en la Escuela Politécnica Nacional de Quito – Ecuador, recibió su grado de Magister en Educación Universitaria en 2010 en la Universidad Tecnológica Indoamérica de Quito, Ecuador. En el presente trabaja para obtener su grado de PHD en Ingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín – Colombia. Es miembro del Grupo de Investigación en Redes Eléctricas Inteligentes – GIREI. Sus trabajos de investigación están relacionados con técnicas de modelado y simulación matemática para la planificación de redes de distribución eléctrica en redes inteligentes.

ecorrea@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda Prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2015 Universidad Politécnica Salesiana
QUITO – ECUADOR

DEDICATORIA.

A mis padres Angel y Cecilia que con su sabiduría, comprensión y amor me han guiado por esta travesía llamada vida y a quienes debo todo lo que soy.

A mi hermano Roberto que siempre ha sido un gran ejemplo y a quien admiro mucho.

A mi familia y en especial a mi tío Jorge que siempre me ha apoyado incondicionalmente durante toda mi vida y a quien debo muchos de mis logros.

A mis amigos y compañeros que han estado presentes en este proceso de formación académica.

A esa persona especial, Daniela, que ha estado presente durante este proceso académico y quien ha sido un gran apoyo.

AGRADECIMIENTO.

A mis profesores de la ESFOT – EPN quienes aportaron en mi formación profesional que ha sido muy importante para esta etapa académica.

A los profesores de la Universidad Politécnica Salesiana que han compartido sus conocimientos durante todo este proceso académico.

A Estuardo Correa que me ha sabido guiar durante el proceso de titulación como docente tutor, por su confianza y apoyo.

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo, Estuardo Josafat Correa Zapata declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación *Diagnóstico de Fallos Eléctricos en Líneas de Transmisión Utilizando Algoritmo de Relief* realizado por Angel Giovanny Toapanta Guamán, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, Noviembre 2015

.....

Estuardo Josafat Correa Zapata

Cédula de identidad: 170818330-4

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Angel Giovanni Toapanta Guamán, con documento de identificación N° 171729033-0, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor/es del trabajo de grado/titulación intitulado: “Diagnóstico de Fallos Eléctricos en Líneas de Transmisión Utilizando Algoritmo de Relief ”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Firma

.....

Nombre: Angel Giovanni Toapanta Guamán

Cédula: 171729033-0

Fecha: 24/11/2015

GLOSARIO

A

ARCHIVO PLANO .OUT: Es un archivo de exportación de datos del software DigSILENT PowerFactory, en el cual se encuentran datos separados por tabulaciones que posteriormente pueden ser importados por MS Excel dando como resultado un archivo con datos ordenados en columnas.

C

COMPONENTES SIMÉTRICAS: Fortescue en su teorema establece que se puede realizar el estudio de fasores desequilibrados mediante la descomposición en tres componentes equilibrados, componentes de secuencia positiva, negativa y cero [1].

COMPONENTES DE SECUENCIA POSITIVA: También conocida como secuencia directa, está conformada por tres fasores desfasados 120° pero de la misma magnitud y la misma secuencia de fases que el fasor original [1].

COMPONENTES DE SECUENCIA NEGATIVA: También conocida como secuencia inversa, está conformada por tres fasores desfasados 120° pero de la misma magnitud y de secuencia de fases inversa a la del fasor original [1].

COMPONENTES DE SECUENCIA CERO: También conocida como secuencia homopolar, está formada por tres fasores de la misma magnitud pero sin desfase alguno [1].

CORTOCIRCUITO: Pérdida de aislamiento entre dos puntos de diferente potencial.

D

DIAGNÓSTICO: Son los resultados que se obtienen después de realizar un estudio, los cuales permiten reflejar el estado de un sistema para posteriormente realizar acciones correctivas de ser el caso.

DigSILENT POWER FACTORY: Es un software de análisis de sistemas eléctricos de potencia, el cual permite realizar varios estudios en cada una de las etapas del sistema eléctrico de potencia. Análisis como despacho de carga, análisis de corto circuitos, sistemas de protecciones, entre otros.

DISTRIBUCIÓN: Etapa del sistema eléctrico donde la energía es suministrada a los centros de consumo [2].

F

FALLA: Comportamiento anormal de un componente de un sistema.

G

GENERACIÓN ELÉCTRICA: Se produce en máquinas capaces de transformar algún tipo de fuente primaria o secundaria de energía en energía eléctrica [2].

L

LÍNEA DE TRANSMISIÓN: Conductor que permite el transporte de energía eléctrica, posee importantes propiedades eléctricas que afectan directamente a la transmisión de energía eléctrica [3].

LOCALIZACIÓN DE LA LÍNEA EN FALLA: Es la determinación de la línea o líneas de transmisión en las cuales se ha producido una falla, estas pueden ser falla línea tierra (L-G), falla doble línea tierra (L-L-G), falla doble línea (L-L) y falla trifásica (L-L-L) o falla simétrica

R

RELIEF: Algoritmo de selección de características o atributos mediante una clasificación binaria, propuesto por Kira y Rendell en 1992 [4].

S

SISTEMA ELECTRICICO DE POTENCIA: Con sus siglas SEP, es un sistema compuesto de tres etapas básicas: la generación de energía eléctrica, sistemas de transmisión y sistemas de distribución; cada una de estas tiene sus características particulares, así por ejemplo la etapa de generación de energía eléctrica se la puede realizar con distintos tipos de energía primaria como el aire – generación eólica, agua – generación hidráulica, combustibles fósiles – generación térmica. Los sistemas de transmisión están formados por transformadores de elevación y líneas de transmisión y por último los sistemas de distribución cuentan con transformadores de reducción y líneas de distribución. Cada una de las etapas de un SEP cuenta con un sistema de protecciones y sistemas de monitoreo.

INDICE GENERAL

<i>GLOSARIO</i>	III
<i>INDICE GENERAL</i>	V
<i>INDICE DE FIGURAS</i>	V
<i>INDICE DE TABLAS</i>	VI
<i>TÍTULO DE LA INVESTIGACIÓN</i>	1
<i>RESUMEN DEL PROYECTO</i>	1
<i>ABSTRACT</i>	1
1. <i>INTRODUCCIÓN</i>	2
1.1 <i>Planteamiento del Proyecto</i>	2
1.2 <i>Estado del Arte</i>	4
2. <i>OBJETIVOS</i>	7
<i>OBJETIVO GENERAL</i>	7
<i>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</i>	7
3. <i>METODOLOGÍA</i>	7
4. <i>DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN</i>	7
4.1 <i>Fallas en líneas de transmisión.</i>	7
4.2 <i>Tipos de fallas.</i>	8
4.2.1 <i>Fallas Línea – Tierra (L – G) [18], [20], [24]</i>	8
4.2.2 <i>Fallas Línea – Línea – Tierra (L – L – G) [18], [20], [24]</i>	10
4.2.3 <i>Fallas Línea – Línea (L – L) [18], [20], [24]</i>	11
4.2.4 <i>Fallas Trifásica (L-L-L) [18], [20], [24].</i>	12
4.3 <i>Relief.</i>	12
4.3.1 <i>Algoritmo Relief.</i>	13
5. <i>RESULTADOS ESPERADOS</i>	14
5.1 <i>Escenario 1.</i>	15
5.2 <i>Escenario 2.</i>	15
5.3 <i>Escenario 3.</i>	15
5.4 <i>Escenario 4.</i>	16
6. <i>ESTRATEGIA PARA LA DIVULGACIÓN DE LOS RESULTADOS</i>	16
7. <i>SECTORES BENEFICIADOS</i>	16
8. <i>CONCLUSIONES</i>	17
9. <i>REFERENCIAS</i>	18

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Esquema modelo para el diagnóstico de fallos en líneas de transmisión.</i>	3
<i>Figura 2. Indicadores de la Matriz del Estado del Arte</i>	6
<i>Figura 3. Circuito equivalente en una falla línea tierra.</i>	9

Figura 4.	Comportamiento de: (a) corrientes y (b) tensiones durante una falla línea tierra.	9
Figura 5.	Comportamiento de: (a) corrientes y (b) tensiones durante una falla línea línea tierra.	10
Figura 6.	Circuito equivalente en una falla línea línea tierra.....	10
Figura 7.	Comportamiento de: (a) corrientes y (b) tensiones durante una falla línea línea.	11
Figura 8.	Circuito equivalente en una falla línea línea.....	11
Figura 9.	Comportamiento de: (a) corrientes y (b) tensiones durante una falla trifásica.	12
Figura 10.	Circuito equivalente en una falla trifásica.....	12
Figura 11.	Modelo IEEE de 9 barras.	14
Figura 12.	Estado de las líneas usando el algoritmo Relief – Escenario 1.....	15
Figura 13.	Estado de las líneas usando el algoritmo Relief – Escenario 2.....	15
Figura 14.	Estado de las líneas usando el algoritmo Relief – Escenario 3.....	16
Figura 15.	Estado de las líneas usando el algoritmo Relief – Escenario 4.....	16

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Matriz del estado del arte	5
Tabla 2.	Resumen del algoritmo Relief – Escenario 1.....	15
Tabla 3.	Resumen del algoritmo Relief – Escenario 2.....	15
Tabla 4.	Resumen del algoritmo Relief – Escenario 3.....	16
Tabla 5.	Resumen del algoritmo Relief – Escenario 4.....	16

TÍTULO DE LA INVESTIGACIÓN

DIAGNÓSTICO DE FALLOS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN UTILIZANDO ALGORITMO DE RELIEF

RESUMEN DEL PROYECTO

En este documento se presenta el diagnóstico de fallas eléctricas en líneas de transmisión utilizando el algoritmo Relief. El diagnóstico de fallas se divide principalmente en: detección de la falla, direccionalidad de la falla, clasificación de la falla, localización de la falla y causas de la falla; en el presente estudio se aborda: la detección, clasificación de fallas en líneas de transmisión y la determinación de las fases en falla, para ello se utiliza un método de selección de características (algoritmo Relief). Las líneas de transmisión permiten transportar la energía desde los centros de generación hacia los principales puntos de distribución de energía eléctrica, es por esta razón que su óptimo funcionamiento es de vital importancia para el sistema eléctrico de potencia. El diagnóstico de fallas permite detectar la línea y fases en falla además de clasificar los tipos de fallas más comunes con lo cual se puede tomar decisiones para reducir al máximo las fallas en las líneas. El algoritmo Relief analiza los datos eléctricos de los cuales se obtendrán: la línea en falla, las fases de la línea en falla y el tipo de falla. El documento se estructura de la siguiente manera: al inicio se presenta el estado del arte, los distintos métodos o algoritmos que se han utilizado para el diagnóstico de fallas. Posteriormente una descripción breve de Relief y su algoritmo de clasificación basado en la evaluación de características. Por último se realiza una aplicación práctica (caso de estudio) en el cual se aplica dicho algoritmo para identificar la línea en falla y clasificar la falla. Para finalizar se presentan las conclusiones y futuros trabajos que se obtienen en la investigación.

ABSTRACT

In this document present the fault diagnosis in transmission lines using the algorithm Relief. Fault diagnosis is mainly divided into: fault detection, directionality of the fault, the fault classification, fault location and cause of the failure; this study is addressed into fault detection and classification in transmission lines and determination of faulty phases, for this a feature selection method (algorithm Relief) is used. Transmission lines allow transport energy from generation centers to the main points of distribution of electricity, according to this the optimum performance is vital for the power system. Fault diagnosis can detect the fault line and phases in addition to classify the most common fault types can make decisions to minimize the line failure. Relief algorithm analyzes the electrical data of which will be

delivered: the line fails, the phases of the line fault and the fault type. The document is structured as follows: at the beginning the state of the art is presented, various methods or algorithms that have been used for fault diagnosis. Later a brief description of Relief and classification algorithm based on evaluation of features. Finally a practical application (case study) in which the algorithm is applied to identify the faulty line and classify the fault is performed. Finally conclusions and future work are obtained in the research are presented.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del Proyecto

En los sistemas eléctricos de potencia, las líneas de transmisión representan eslabones muy importantes que garantizan en un alto porcentaje la continuidad del servicio eléctrico ya que se encargan del transporte de energía desde las estaciones de generación hasta los centros de distribución [5]; estos sistemas se han vuelto cada día más inteligentes en términos de despliegue de nuevas tecnologías para el envío, almacenamiento y análisis de datos que en conjunto con algoritmos inteligentes son capaces de brindar un mayor grado de protección al sistema de transmisión [6].

Según [7] las líneas de transmisión constituyen el componente más vulnerable del sistema eléctrico de potencia; además es el componente con la tasa más alta de fallas debido a factores mecánicos, eléctricos y en su mayoría ambientales a las cuales se encuentran expuestas las líneas de transmisión.

La ubicación de las fallas en líneas de transmisión permite, desde el punto de vista económico, el correcto funcionamiento de los mercados eléctricos, reducir pérdidas económicas, reducir costos operativos, ahorrar tiempo y esfuerzos del equipo de mantenimiento y fundamentalmente la rápida restauración del sistema [5], [7]–[9]. El diagnóstico de fallas se encarga de analizar esta problemática, abordándola principalmente en cuatro temas: direccionalidad de la falla, clasificación de la falla, localización de la falla y causas de la falla; la metodología de este análisis ha ido mejorando con el tiempo, se ha migrado de métodos tradicionales a nuevas técnicas, métodos o algoritmos [6]. En [10] se propone un novedoso algoritmo de localización de fallas sin la utilización de los parámetros de las líneas; es decir, resistencia, inductancia, capacitancia y conductancia. Existen combinaciones de métodos como es el caso de [11] que desarrollan el diagnóstico por etapas, la primera etapa utiliza lógica difusa para la detección de la falla, mientras que para la etapa de diagnóstico utiliza distancias Euclidianas y por último utiliza redes neuronales probabilísticas para determinar el tipo de falla. Además, se puede encontrar una serie de

algoritmos utilizados específicamente para la localización y clasificación de fallas como algoritmos genéticos [12], combinación de Wavelet y ANFIS (Adaptive Network and Fuzzy Inference System) [13], [14].

Parte fundamental e indispensable para este estudio son los datos a procesar que se obtienen del sistema. Existen diferentes equipos con diferentes tecnologías los cuales permiten la adquisición de datos del sistema; entre los cuales, la tecnología de medición fasorial ha llegado a ser una de las más importantes porque utiliza sistemas de posicionamiento global como base de tiempo para sincronizar los fasores de tensión y corriente [15].

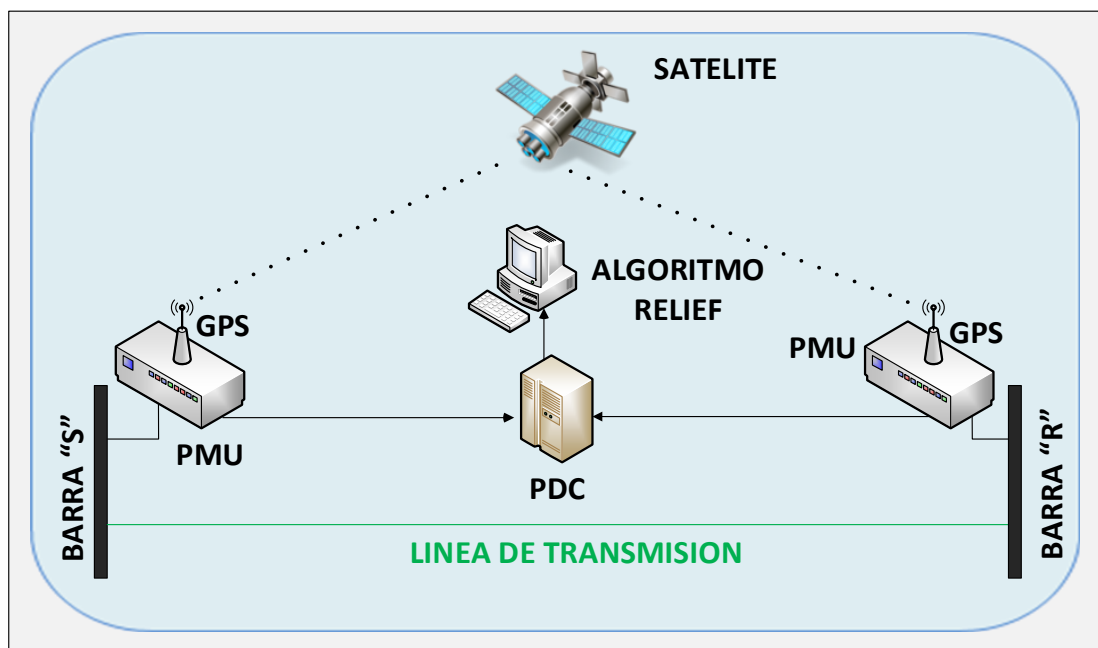


Figura 1. Esquema modelo para el diagnóstico de fallos en líneas de transmisión.

En la Figura 1 se puede observar cómo está compuesta una línea de transmisión con el uso de unidades de medición fasorial (PMUs), además posee un concentrador de datos (PDC) que se encarga de almacenar todos los datos del sistema [16], [17].

Debido a la importancia del diagnóstico de fallas, esta investigación propone realizar la detección y clasificación de fallas en líneas de transmisión y la determinación de las fases en falla mediante el uso de un método o algoritmo de selección de características como Relief.

1.2 Estado del Arte

DIAGNÓSTICO DE FALLOS ELÉCTRICOS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN UTILIZANDO ALGORITMO DE RELIEF																																	
ITEM	DATOS			TEMÁTICA						FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA						SOLUCIÓN PROPUESTA									
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REFERENCIA	PMU	POWER SYSTEMS	FAULT DETECTION	FAULT LOCATION	FAULT CLASSIFICATION	FAULT IDENTIFICATION	FAULT DIAGNOSIS	MINIMIZE FAULTS	REDUCE DISCONNECTION TIME	REDUCE COSTS	FAULT DIAGNOSIS	FAULT IDENTIFICATION	SAMPLING TIME	PROCESSING SPEED	TRANSMISSION LINES PARAMETERS	SYNCHRONIZED MEASUREMENTS	UNSYNCHRONIZED MEASUREMENTS	DISCRETE FOURIER TRANSFORM DFT	ARTIFICIAL NEURAL NETWORK ANN	WAVELET TRANSFORM	THEVENIN EQUIVALENT NETWORK	FUZZY LOGIC	ANFIS	MONTE CARLO	UNSYNCHRONIZED MEASUREMENTS	SYNCHRONIZED MEASUREMENTS	FEATURE SELECTION	DISCRIMINATE REDUNDANT FEATURES	PROCESSING SPEED	
1	2000	An adaptive PMU based fault detection/location technique for transmission lines. I. Theory and algorithms	{Jiang et al}	X		X	X				X	X		X	X	X	X		X		X		X						X	X			X
2	2015	All shunt fault location including cross-country and evolving faults in transmission lines without fault type classification	{Swetapadma and Yadav}				X						X		X		X		X		X	X							X		X		X
3	2012	Fault location on transmission lines using complex-domain neural networks	{Da Silva et al}				X				X		X	X	X	X	X		X			X	X						X	X			X
4	2015	A new wavelet based fault detection, classification and location in transmission lines	{Shaik and Pulipaka}			X	X	X				X	X	X	X		X	X	X			X	X						X	X			X
5	2010	Accurate one-end fault location for overhead transmission lines in interconnected power systems	{Eisa and Ramar}				X					X	X	X	X		X		X					X					X		X		X
6	2010	A novel algorithm for locating faults on transposed/untransposed transmission lines without utilizing line parameters	{Apostolopoulos and Korres}				X				X			X	X	X	X		X									X	X				X

7	2014	Detección y diagnóstico de fallas en sistemas eléctricos de potencia combinando lógica difusa, métricas y una red neuronal probabilística	{Octavio et al}			X				X	X			X	X			X		X			X						X		X	
8	2014	A machine learning and wavelet-based fault location method for hybrid transmission lines	{Livani et al}				X				X			X	X			X	X	X	X								X		X	X
9	2008	Performance evaluation of an adaptive-network-based fuzzy interface system approach for location of faults on transmission lines using Monte Carlo simulation	{Reddy and Mohanta}				X				X	X			X	X	X		X				X		X				X		X	
10	2007	Algoritmo neuro difuso para la detección y clasificación de fallas en líneas de transmisión eléctrica usando ANFIS	{Calderón et al}			X	X				X			X	X	X	X		X	X		X			X				X	X	X	
11	2000	An adaptive PMU based fault detection/location technique for transmission lines. II. PMU implementation and performance	{Jiang et al}	X		X	X				X	X		X	X	X	X		X		X	X							X	X		X
12	2011	IEEE standard for synchrophasor data transfer for power systems	{IEEE Power and Energy Society}	X								X						X											X			X
13	2013	IEEE guide for phasor data concentrator requirements for power system protection, control, and monitoring	{IEEE Power and Energy Society}	X								X						X											X			X
14	2002	Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica	{Expósito and Abur}	X	X						X	X	X				X	X	X	X		X						X	X			X
15	2005	Simulación de sistemas eléctricos	{Belver et al}	X	X						X	X	X				X	X	X	X		X						X	X			X
16	2008	Electric energy systems: analysis and operation	{Expósito et al}	X	X						X	X	X				X	X	X	X		X						X	X			X
17	1994	Power system stability and control	{Kundur et al}	X	X						X	X	X				X	X	X	X		X						X	X			X
18	2005	Application of wavelet multiresolution analysis for identification and classification of faults on transmission lines	{Chanda et al}						X	X		X			X	X	X	X		X		X									X	X
19	2008	A DSP based frequency domain approach for classification of transmission line faults	{Reddy and Mohanta}					X			X				X		X			X									X	X		
				8	4	5	10	3	1	1	14	9	10	9	13	7	13	7	16	7	10	7	10	1	2	1	1	5	16	8	5	17

TABLA 1. MATRIZ DEL ESTADO DEL ARTE

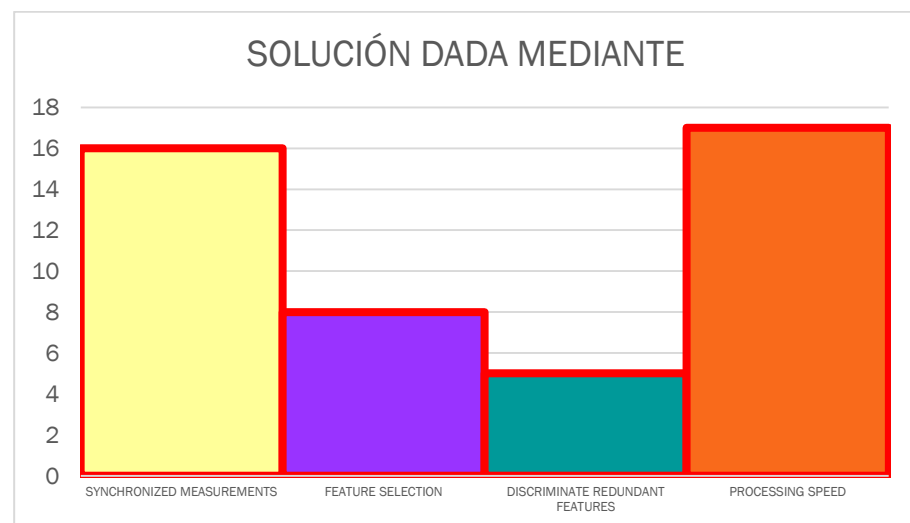
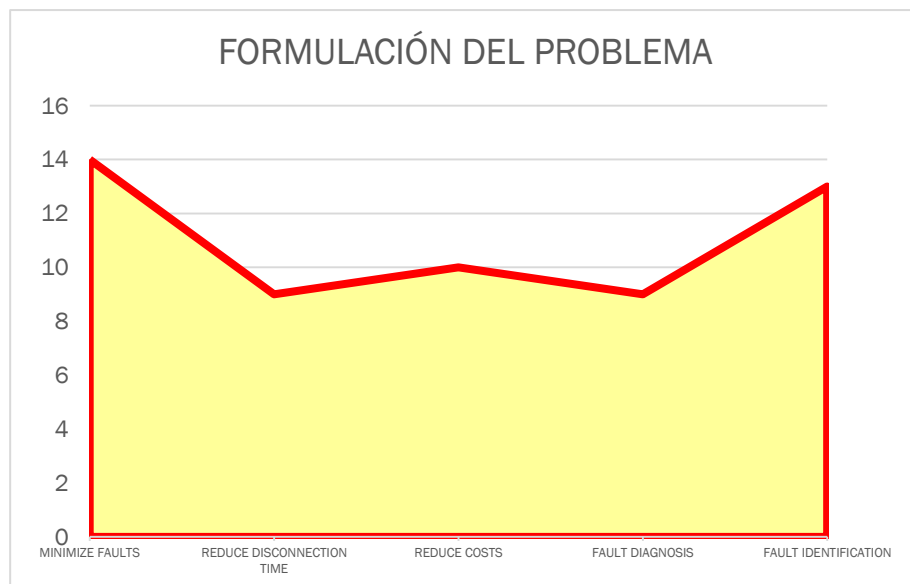
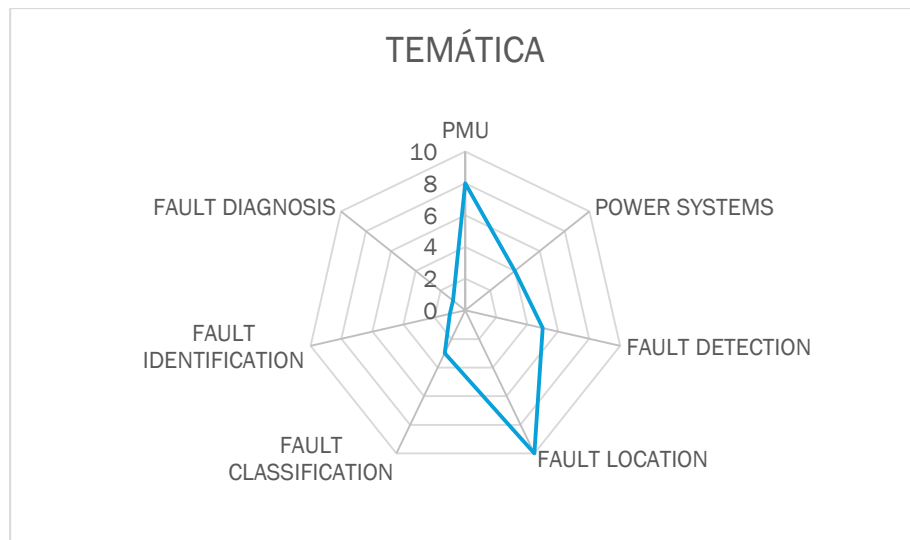


Figura 2. Indicadores de la Matriz del Estado del Arte

2. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Diagnosticar fallos eléctricos en líneas de transmisión usando el algoritmo Relief.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar un algoritmo para identificar la línea de transmisión en falla, el tipo de falla (falla línea tierra L-G, falla doble línea tierra L-L-G, falla doble línea L-L y falla trifásica L-L-L o falla simétrica) y las fases en falla de la línea de transmisión.
- Desarrollar un modelo en base al algoritmo Relief para el diagnóstico de fallos eléctricos.
- Analizar el desempeño del modelo propuesto mediante su aplicación en diferentes escenarios, a partir de datos simulados considerados en el proyecto de investigación.

3. METODOLOGÍA

Para analizar el problema de fallos eléctricos, primero se definen todos los posibles escenarios que se pueden presentar; además se define las principales restricciones como son:

a) monitoreo de los parámetros eléctricos en tiempo real, b) velocidad de transmisión de datos desde el equipo que toma los datos hacia el centro de monitoreo, c) alto volumen de datos a ser analizados, d) velocidad de análisis de los datos.

Para esto se utilizará una clasificación binaria en base a una selección de características la cual permite realizar un análisis en menor tiempo ya que selecciona características puntuales de cada línea de transmisión de un sistema eléctrico como es la variación abrupta de los fasores de tensión y corriente.

4. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Fallas en líneas de transmisión.

Existen varios estudios que se realizan a los sistemas eléctricos de potencia, los cuales ayudan a proporcionar y garantizar un suministro de energía de una manera confiable y con una calidad adecuada. Estos estudios se los realiza en condiciones de régimen permanente (flujos de carga, cálculos de cortocircuitos, propagación de armónicos) y condiciones de régimen transitorias (transitorios lentos, electromecánicos, electromagnéticos). Además, éstos estudios ayudan en gran medida a pronosticar el comportamiento del sistema tanto en funcionamiento normal como en el caso de suceder una falla y cuál sería la respuesta del sistema ante una falla así como las consecuencias que ésta tendría sobre los parámetros del

sistema ante dicho evento; esto se lo puede efectuar con la ayuda de programas que permiten realizar simulaciones con cada uno de los casos mencionados (régimen permanente y transitorio) [18], [19].

Las principales fallas que se presentan en líneas de transmisión son los cortocircuitos. Un cortocircuito se produce por la conexión eventual de dos puntos que se encuentran a diferente potencial, dicha conexión puede ser directa entre los dos puntos o a través de una impedancia baja; esto se debe principalmente a la pérdida del aislamiento provocado por el desgaste, contaminación, sobretensiones, esfuerzos mecánicos y a las inclemencias del clima a la cual se encuentran expuestas las líneas de transmisión [20], [21].

4.2 Tipos de fallas.

Las fallas de líneas de transmisión en un sistema eléctrico de potencia se clasifican en: falla línea tierra (L-G), falla doble línea tierra (L-L-G), falla doble línea (L-L) y falla trifásica (L-L-L) o falla simétrica [22], [23].

Sea una línea de transmisión cuyas fases son A, B, C se tendrán sus componentes simétricas de la siguiente manera:

$$I_{sim}^A = I_{sim}^B = I_{sim}^C = \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

Donde:

I_0 es la componente de secuencia cero.

I_1 es la componente de secuencia positiva.

I_2 es la componente de secuencia negativa.

$$V_{sim}^A = V_{sim}^B = V_{sim}^C = \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

Donde:

V_0 es la componente de secuencia cero.

V_1 es la componente de secuencia positiva.

V_2 es la componente de secuencia negativa.

4.2.1 Fallas Línea – Tierra (L – G) [18], [20], [24]

Se presenta en una sola fase de la línea de transmisión; se caracteriza por el aumento de corriente y caída de tensión en la fase con falla. Esta falla puede ser de baja, media o alta

impedancia.; sin embargo, en el caso de las fallas de alta impedancia, la corriente en la fase en falla puede no presentar mayor variación por lo que en muchos casos puede llegar a no ser detectada.

Si la falla es en la fase A se tiene:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{CC1\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \text{ y } V_A = 0 \quad (3)$$

Y en componentes simétricas:

$$I_0^A = I_1^A = I_2^A = \frac{1}{3} I_A \quad (4)$$

$$V_A = V_0^A = V_1^A + V_2^A = 0 \quad (5)$$

Esto quiere decir que las redes de secuencia positiva (Z1), negativa (Z2) y cero (Z0) están conectados en serie, como se puede ver en la Figura 3.

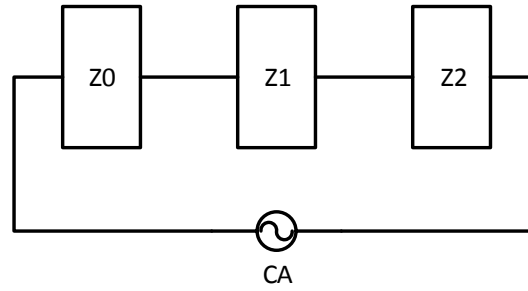


Figura 3. Circuito equivalente en una falla línea tierra.

En la Figura 4(a) se puede ver cómo ha aumentado la corriente en la fase con falla, mientras que en la Figura 4 (b) se observa la distorsión que ocurre en la fase en falla.

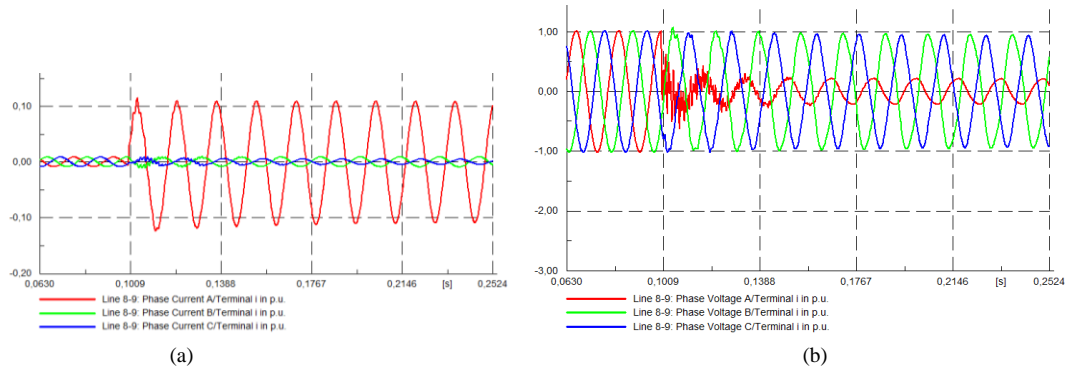


Figura 4. Comportamiento de: (a) corrientes y (b) tensiones durante una falla línea tierra.

4.2.2 Fallas Línea – Línea – Tierra (L – L – G) [18], [20], [24]

Típicamente se produce por la caída de una de las líneas sobre la otra línea y con un extremo se conduce a tierra. Esta falla se caracteriza por un aumento de corriente en las fases con falla y una caída de tensión en las mismas (Figura 5).

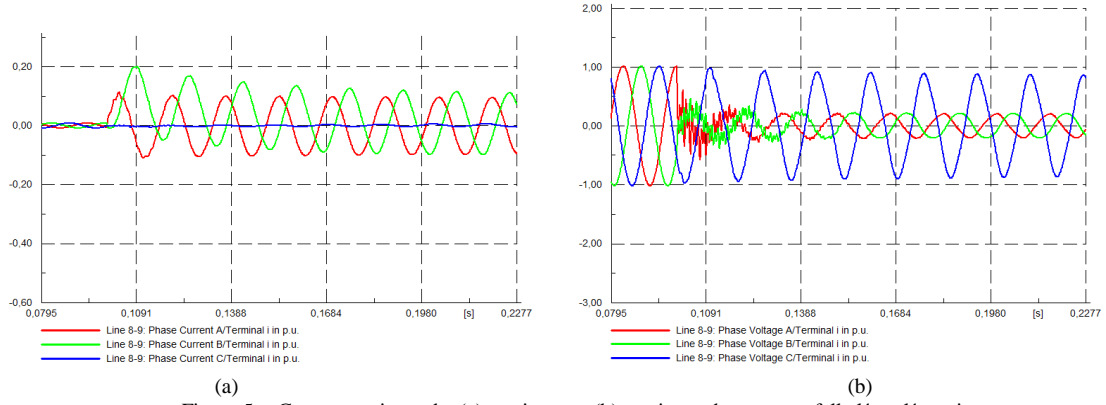


Figura 5. Comportamiento de: (a) corrientes y (b) tensiones durante una falla línea línea tierra.

Si la falla es en las fases A y B se tiene:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{CC2\phi G} \\ I_{CC2\phi G} \\ 0 \end{bmatrix}, y \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ V_C \end{bmatrix} \quad (6)$$

Y en componentes simétricas:

$$I_1^C = -(I_0^C + I_2^C) \quad (7)$$

$$V_0^C = V_1^C = V_2^C = \frac{1}{3} V_C \quad (8)$$

Esto quiere decir que las redes de secuencia positiva (Z1), negativa (Z2) y cero (Z0) están conectados en paralelo, como se puede ver en la Figura 6.

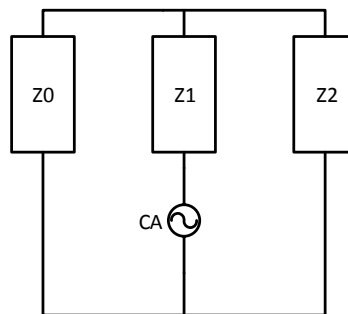


Figura 6. Circuito equivalente en una falla línea línea tierra.

4.2.3 Fallas Línea – Línea (L – L) [18], [20], [24]

Se presenta en dos fases sin ningún contacto a tierra, esto principalmente por cambios en la rigidez dieléctrica y propiedades de conducción del aislante (aire). Las corrientes de las dos fases en falla aumenta (Figura 7.a), como en la falla línea línea tierra, de igual forma el tensión en las dos fases en fallas aumenta (Figura 7.b).

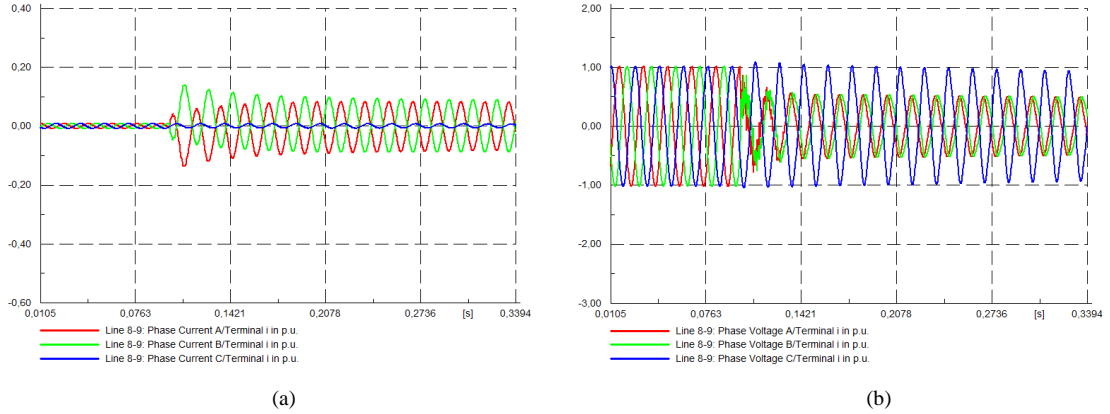


Figura 7. Comportamiento de: (a) corrientes y (b) tensiones durante una falla línea línea.

Si la falla es en las fases B y C se tiene:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ -I_B \end{bmatrix}, \text{ y } \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_B \end{bmatrix} \quad (9)$$

Y en componentes simétricas:

$$I_0^A = 0 \quad (10)$$

$$I_1^A = -I_2^A \quad (11)$$

$$V_1^A = V_2^A \quad (12)$$

Esto quiere decir que las redes de secuencia positiva (Z1) y negativa (Z2) están conectados en paralelo, como se puede ver en la Figura 8.

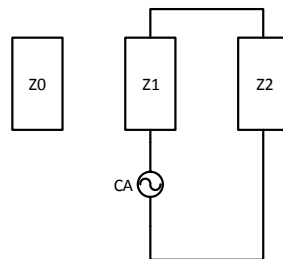


Figura 8. Circuito equivalente en una falla línea línea.

4.2.4 Fallas Trifásica (L-L-L) [18], [20], [24].

Ocurre cuando las tres líneas se ponen en contacto entre si produciendo caídas de tensión (Figura 9.a) y variaciones en las corrientes en cada línea en falla (Figura 9.b).

La falla trifásica es una falla simétrica, en este caso las fases en falla son las tres (A, B y C) de tal manera que:

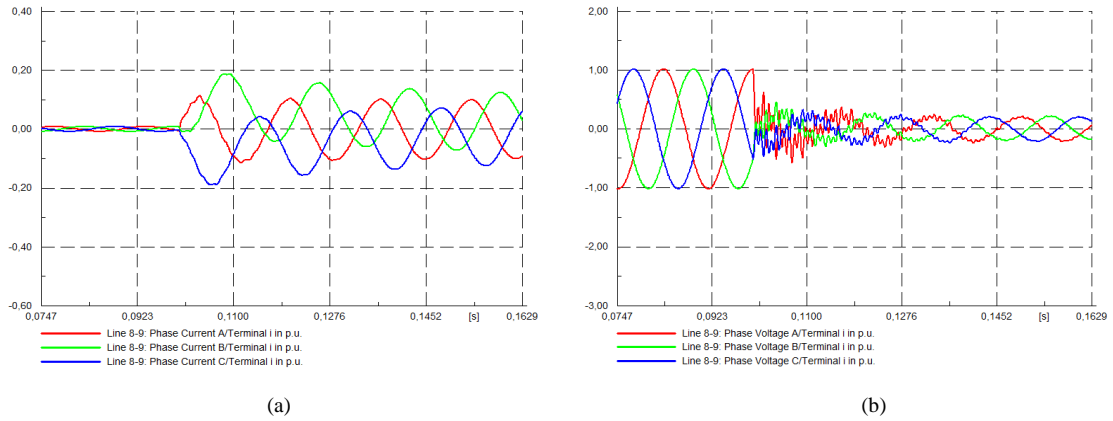


Figura 9. Comportamiento de: (a) corrientes y (b) tensiones durante una falla trifásica.

$$I_A + I_B + I_C = 0, \text{ y } \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Y en componentes simétricas:

$$I_2 = I_0 = 0 \quad (14)$$

$$V_0 = V_1 = V_2 = 0 \quad (15)$$

Esto quiere decir que el análisis se lo hace únicamente con la red de secuencia positiva (Z1) como se observa en la Figura 10.

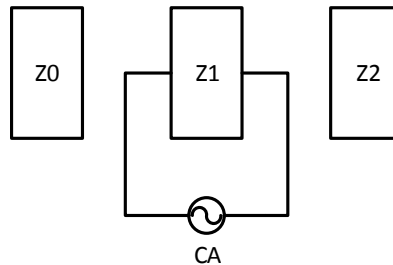


Figura 10. Circuito equivalente en una falla trifásica.

4.3 Relief.

Según [4] Relief es un algoritmo de selección de características o atributos que, a diferencia de otros métodos como Ant Colony Optimization ó Rough Set Theory [25], evita una

búsqueda heurística y utiliza métodos estadísticos; evalúa estas características dentro de un rango de valores dados (umbral), y selecciona a aquellas características que se encuentren en el rango seleccionado.

El algoritmo Relief es considerado como una de las herramientas más eficientes para la selección de características en problemas de clasificación y regresión utilizados en la etapa de pre-procesamiento; este algoritmo se limita a problemas de clasificación de dos clases. Para la aplicación en problemas de clasificación multi-clase se tiene una extensión al original llamado ReliefF. Además, Relief cuenta con una versión mejorada para problemas de regresión conocido como RReliefF [26], [27].

4.3.1 Algoritmo Relief.

Algoritmo Relief para diagnóstico de fallas

Step1: Tabulación de datos: tensiones y corrientes pre-falla de cada fase de cada línea, corriente de cortocircuito, corriente de secuencias positiva negativa y cero de cada línea en sistema por unidad.

Step2: Selección del conjunto de características de referencia, tensiones y corrientes pre-falla.

$$F = \{f_1, f_2, f_3, \dots, f_n\}, \quad (16)$$

Step3: Selección del conjunto de características a comparar, tensiones y corrientes en-falla, corrientes de cortocircuito, corrientes simétricas (secuencia positiva, negativa y cero).

$$X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}, \quad (17)$$

Donde x_j denota un valor del conjunto de características f_j de X .

Step4: Comparación de los conjuntos de características F y X . Dado f_k y x_k la diferencia de características está dada por:

$$\text{diff}(f_k, x_k) = \begin{cases} 1 \rightarrow f_k = x_k \\ 0 \rightarrow f_k \neq x_k \end{cases}, \quad (18)$$

Donde, si:

$\text{diff}(f_k, x_k)=1$ se considera que existe falla.

$\text{diff}(f_k, x_k)=0$ se considera que no existe falla.

Step5: Se determina la línea en falla con el resultado de la comparación entre tensión, corriente, corriente de cortocircuito y componentes simétricas con datos de pre-falla y de falla.

Step6: Se crea un vector de ubicación de la falla y se realiza un gráfico.

Step7: Se determina la fase o fases de la línea en falla con el resultado de la comparación entre tensión y corriente con datos de pre-falla y de falla.

Step8: Se imprime una tabla de resultados con la ubicación de la falla (Step6) y las fases en falla (Step7).

Fin

5. RESULTADOS ESPERADOS

El estudio se lo realiza utilizando el modelo IEEE de 9-barras [28] el cual está compuesto, en forma general, por: seis líneas de transmisión, tres transformadores, tres generadores y tres cargas como se puede ver en la Figura 10. Con el uso del software DigSILENT PowerFactory en su versión v15.1 el cual permite realizar estudios en sistemas eléctricos de potencia, se realizan simulaciones de fallas en distintas líneas con diferentes características.

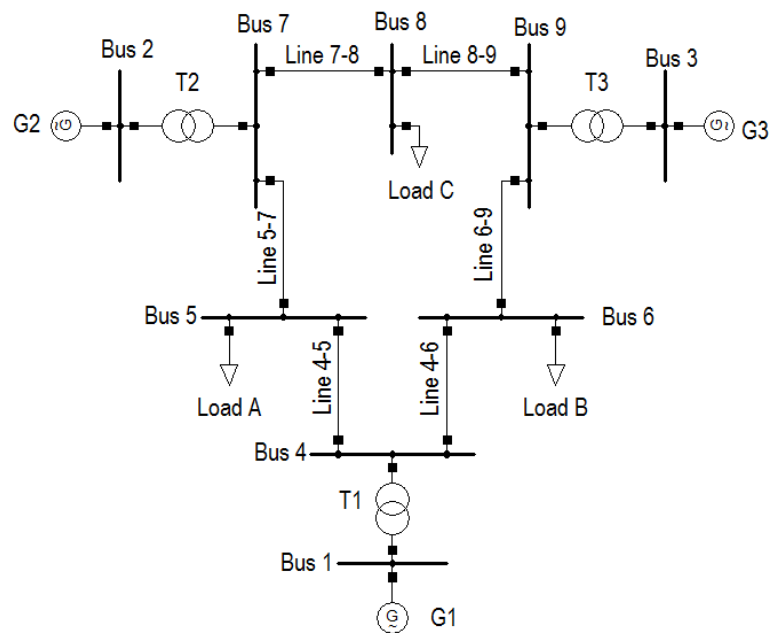


Figura 11. Modelo IEEE de 9 barras.

Para verificar el funcionamiento, se realiza cuatro escenarios al modelo de estudio; cada escenario contiene 4 fallas en distintas líneas, con 111 muestras con 55356 datos. DigSILENT PowerFactory permite exportar todos estos datos de la simulación en un archivo plano de extensión .OUT; posteriormente este archivo es trasladado a MS Excel el cual permite tener organizados dichos datos para luego ser procesados en MatLab mediante el algoritmo Relief propuesto y descrito anteriormente.

Los resultados se muestran en dos gráficos. El primero es una imagen binaria del estado de las líneas; así, al detectar una falla el estado cambia a 1 y en el caso de no existir falla el estado es 0. El segundo gráfico es una tabla que resume el resultado obtenido al analizar los datos con el algoritmo Relief, se tabula la línea, el nombre que posee la línea en el diagrama de DigSILENT PowerFactory, el estado de la línea y por último las fases en falla.

5.1 Escenario 1.

Se simulan dos fallas trifásicas en las líneas 3 y 6 y dos fallas Línea-Línea-Tierra (LLG) en las líneas 2 y 5 con fallas en las fases AB y CA respectivamente.

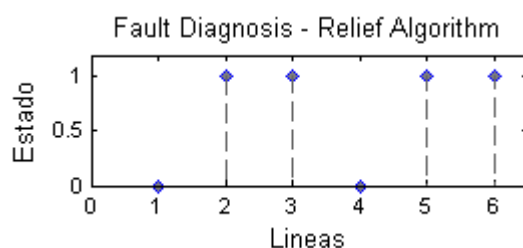


Figura 12. Estado de las líneas usando el algoritmo Relief – Escenario 1.

	Nombre Línea	Estado Línea	Fases Falla
Línea 1	Línea 5-7	Sin Falla	---
Línea 2	Línea 4-6	Falla LLG	A-B
Línea 3	Línea 6-9	Falla LLL	ABC
Línea 4	Línea 7-8	Sin Falla	---
Línea 5	Línea 8-9	Falla LLG	C-A
Línea 6	Línea 4-5	Falla LLL	ABC

TABLA 2. RESUMEN DEL ALGORITMO RELIEF – ESCENARIO 1.

5.2 Escenario 2.

Se simulan dos fallas trifásicas en las líneas 2 y 5 y dos fallas Línea-Línea-Tierra (LLG) en las líneas 1 y 4 con fallas en las fases CA y AB respectivamente.

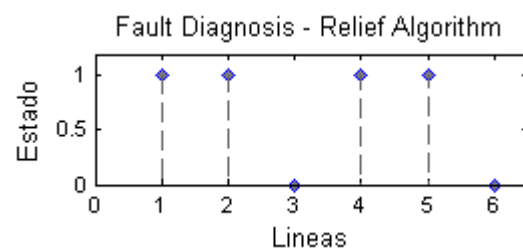


Figura 13. Estado de las líneas usando el algoritmo Relief – Escenario 2.

	Nombre Línea	Estado Línea	Fases Falla
Línea 1	Línea 5-7	Falla LLG	C-A
Línea 2	Línea 4-6	Falla LLL	ABC
Línea 3	Línea 6-9	Sin Falla	---
Línea 4	Línea 7-8	Falla LLG	A-B
Línea 5	Línea 8-9	Falla LLL	ABC
Línea 6	Línea 4-5	Sin Falla	---

TABLA 3. RESUMEN DEL ALGORITMO RELIEF – ESCENARIO 2.

5.3 Escenario 3.

Se simulan dos fallas trifásicas en las líneas 1 y 4 y dos fallas Línea-Línea-Tierra (LLG) en las líneas 3 y 6 con fallas en las fases AB y CA respectivamente.

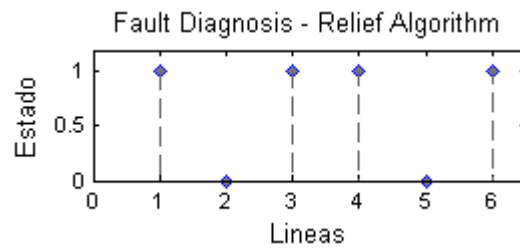


Figura 14. Estado de las líneas usando el algoritmo Relief – Escenario 3.

	Nombre Línea	Estado Línea	Fases Falla
Línea 1	Línea 5-7	Falla LLL	ABC
Línea 2	Línea 4-6	Sin Falla	---
Línea 3	Línea 6-9	Falla LLG	A-B
Línea 4	Línea 7-8	Falla LLL	ABC
Línea 5	Línea 8-9	Sin Falla	---
Línea 6	Línea 4-5	Falla LLG	C-A

TABLA 4. RESUMEN DEL ALGORITMO RELIEF – ESCENARIO 3.

5.4 Escenario 4.

Se simulan dos fallas trifásicas en las líneas 1 y 5 y una falla Línea-Línea-Tierra (LLG) en la línea 3 con falla en las fases AB.

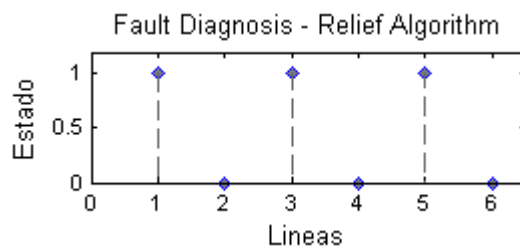


Figura 15. Estado de las líneas usando el algoritmo Relief – Escenario 4.

	Nombre Línea	Estado Línea	Fases Falla
Línea 1	Línea 5-7	Falla LLL	ABC
Línea 2	Línea 4-6	Sin Falla	---
Línea 3	Línea 6-9	Falla LLG	A-B
Línea 4	Línea 7-8	Sin Falla	---
Línea 5	Línea 8-9	Falla LLL	ABC
Línea 6	Línea 4-5	Sin Falla	---

TABLA 5. RESUMEN DEL ALGORITMO RELIEF – ESCENARIO 4.

6. ESTRATEGIA PARA LA DIVULGACIÓN DE LOS RESULTADOS

Dentro de las estrategias de divulgación se plantean las siguientes:

1. Informe escrito final como producto de la tesis. El informe será entregado a biblioteca UPS
2. Jornada Científica de Ingeniería Eléctrica.

7. SECTORES BENEFICIADOS

Los sectores beneficiados con el proyecto son los siguientes:

1. Universidad Politécnica Salesiana

2. Grupos de investigación relacionados con el proyecto
3. Sectores públicos y privados relacionados al tema de investigación

8. CONCLUSIONES

Este artículo presenta un diagnóstico de fallas en líneas de transmisión mediante el uso del algoritmo Relief basado en la ubicación de la línea en falla y clasificación para fallas LG, LLG, LL y LLL; además de la ubicación de la línea del sistema de potencia en falla se determinan las fases implicadas en la falla. Las entradas para el algoritmo Relief son datos históricos del sistema de potencia que se almacenan en tiempo real, muchos de los cuales se procesan de manera inmediata como es el caso de fallas y perturbaciones del sistema; y otros posteriormente como es el caso de la variación de la demanda para la planificación del sistema eléctrico.

Se verificó el algoritmo propuesto en el modelo IEEE de 9 barras para ello se consideró fallas con diferentes características y tiempos de ocurrencia, descritas previamente; los resultados obtenidos permiten verificar que el algoritmo Relief determina la línea y las fases de la línea en falla además de la clasificación de la misma. Sin embargo, a pesar de los buenos resultados se logró identificar algunos problemas que no permitirán su eficiente funcionamiento como son: la cantidad de datos a procesar y el tiempo en que se obtienen los datos.

El algoritmo Relief propuesto en este documento analiza 55356 datos del sistema de potencia por cada escenario planteado, demostrando así que su velocidad de procesamiento se debe a la evaluación individual de las características necesarias para determinar la existencia de una falla, manteniendo la relación existente entre cada característica; esto permite realizar una clasificación binaria que determina la existencia o no de una falla en la línea de transmisión, evitando clasificar una perturbación en lugar de un fallo eléctrico. Esta es la mayor ventaja sobre otros métodos que en muchos casos necesitan parámetros propios de las líneas o esquemas de estimación de fallas para iniciar el algoritmo.

Los resultados del diagnóstico de fallos y su almacenamiento constante permitirán tener una base de datos que posteriormente ayudará a determinar cuáles son las fallas más comunes en cada línea de transmisión, lo cual es de vital importancia para el área de mantenimiento y planificación del sistema eléctrico. El área de mantenimiento logrará crear patrones de conductas de las fallas; es decir un conjunto de características ambientales, eléctricas que pueden dar origen a una falla.

Sin embargo, luego de realizar la presente investigación, se ha llegado a concluir que es de transcendental importancia desarrollar un algoritmo capaz de ubicar exactamente el punto de falla lo que permitirá realizar labores de mantenimiento o reparación de líneas en un menor tiempo.

9. REFERENCIAS

- [1] J. C. Aladro, *Análisis de sistemas de energía eléctrica*. Universidad de Oviedo, 2002.
- [2] P. A. Laplante, *Electrical Engineering Dictionary*, vol. 1. 2000.
- [3] T. Wildi, *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia*. Pearson Educación, 2007.
- [4] K. Kira and L. a Rendell, *A Practical Approach to Feature Selection*. Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 1992.
- [5] J.-A. Jiang, J.-Z. Yang, Y.-H. Lin, C.-W. Liu, and J.-C. Ma, "An adaptive PMU based fault detection/location technique for transmission lines. I. Theory and algorithms," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 15, no. 2, pp. 486–493, Apr. 2000.
- [6] A. Swetapadma and A. Yadav, "All shunt fault location including cross-country and evolving faults in transmission lines without fault type classification," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 123, pp. 1–12, 2015.
- [7] A. P. Alves da Silva, A. C. S. Lima, and S. M. Souza, "Fault location on transmission lines using complex-domain neural networks," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 43, no. 1, pp. 720–727, Dec. 2012.
- [8] A. G. Shaik and R. R. V. Pulipaka, "A new wavelet based fault detection, classification and location in transmission lines," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 64, pp. 35–40, 2015.
- [9] A. A. A. Eisa and K. Ramar, "Accurate one-end fault location for overhead transmission lines in interconnected power systems," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 32, no. 5, pp. 383–389, Jun. 2010.
- [10] C. a. Apostolopoulos and G. N. Korres, "A novel algorithm for locating faults on transposed/untransposed transmission lines without utilizing line parameters," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 25, no. 4, pp. 2328–2338, 2010.
- [11] C. Octavio, H. Morales, J. Pablo, N. González, C. Mexicana, D. Investigación, and M. S. A. D. C. V Comimsa, "Detección y diagnóstico de fallas en sistemas eléctricos de potencia (SEP) combinando lógica difusa , métricas y una red neuronal probabilística," *Res. Comput. Sci.* 72, vol. 72, no. 2014, pp. 47–59, 2014.

- [12] H. Livani, S. Member, C. Y. Evrenosoglu, and S. Member, "A Machine Learning and Wavelet-Based Fault Location Method for Hybrid Transmission Lines," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 1, pp. 51–59, 2014.
- [13] M. J. B. Reddy and D. K. Mohanta, "Performance evaluation of an adaptive-network-based fuzzy inference system approach for location of faults on transmission lines using Monte Carlo simulation," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 16, no. 4, pp. 909–919, 2008.
- [14] J. a. Calderón, G. Zapata, and D. Ovalle, "Algoritmo Neuro - Difuso para la Detección y Clasificación de Fallas en Líneas de Transmisión Eléctrica Usando ANFIS," *Rev. Av. en Sist. e Informática*, vol. 4, no. 1, 2007.
- [15] J.-A. Jiang, Y.-H. Lin, J.-Z. Yang, T.-M. Too, and C.-W. Liu, "An adaptive PMU based fault detection/location technique for transmission lines. II. PMU implementation and performance evaluation," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 15, no. 4, pp. 1136–1146, Oct. 2000.
- [16] IEEE Power and Energy Society, "IEEE Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems," *IEEE Std C37.118.2-2011 (Revision IEEE Std C37.118-2005)*, pp. 1–53, Dec. 2011.
- [17] IEEE Power and Energy Society, *IEEE Guide for Phasor Data Concentrator Requirements for Power System Protection , Control , and Monitoring*, no. May. 2013.
- [18] A. G. Expósito and A. Abur, *Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica*. McGraw-Hill, 2002.
- [19] M. I. Z. Belver, Á. J. M. Sainz-Maza, E. F. Herrero, K. J. S. Buruaga, I. A. Flórez, P. E. López, E. T. Iglesias, and V. V. Santiago, *Simulación de sistemas eléctricos*. Pearson, Prentice-Hall, 2005.
- [20] A. Gomez-Exposito, A. J. Conejo, and C. Canizares, *Electric Energy Systems: Analysis and Operation*. CRC Press, 2008.
- [21] P. Kundur, N. J. Balu, and M. G. Lauby, *Power system stability and control*. McGraw-Hill, 1994.
- [22] D. Chanda, N. K. Kishore, and a. K. Sinha, "Application of wavelet multiresolution analysis for identification and classification of faults on transmission lines," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 73, no. 3, pp. 323–333, 2005.
- [23] M. J. Reddy and D. K. Mohanta, "A DSP based frequency domain approach for classification of transmission line faults," *Digit. Signal Process.*, vol. 18, no. 5, pp. 751–761, 2008.

- [24] D. P. Kothari, *Modern Power System Analysis*. McGraw-Hill Companies, Incorporated, 2006.
- [25] Y. Rodríguez, Y. Fernández, R. B. Pérez, and Y. Caballero, “Selección de atributos relevantes aplicando algoritmos que combinan conjuntos aproximados y optimización en colonias de hormigas,” *Rev. Cuba. Ciencias Informáticas*, vol. 8, no. 1, pp. 140–155, 2014.
- [26] M. Robnik-Šikonja and I. Kononenko, “Theoretical and Empirical Analysis of ReliefF and RReliefF,” *Mach. Learn.*, vol. 53, no. 1–2, pp. 23–69, 2003.
- [27] H. Liu and H. Motoda, *Computational Methods of Feature Selection*. CRC Press, 2007.
- [28] S. Saha and M. Aldeen, “Generic scalable fault diagnosis system for multimachine power grids,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 59, pp. 36–57, 2014.